

2 种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤抗剪强度的影响

李慧^{1,2}, 黄炎和^{2,3}, 蒋芳市^{2,3}, 林金石^{2,3}, 李思诗^{1,3}, 黎钊^{2,3}, 郑喆^{2,3}

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学资环学院, 福州 350002;

3. 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

摘要: 为探讨草本植物根系对崩岗洪积扇土壤抗剪强度的影响, 以巨菌草 (*Pennisetum* sp.) 和宽叶雀稗 (*Paspalum wettsteinii*) 为研究对象, 采用 WinRHIZO 根系分析系统对根系特征进行定量分析, 并采用原位剪切试验测定崩岗洪积扇各土层的抗剪强度。结果表明: (1) 根系能够改善土壤的结构及水分状况; (2) 2 种草本植物根系均主要分布在 0—5 cm 土层, 该层巨菌草根系各参数值是该草种根系均值的 3.1~4.39 倍, 宽叶雀稗的则为 2.23~2.57 倍, 随着土层深度的增加, 巨菌草根系参数呈对数函数减小, 而宽叶雀稗呈线性减小; (3) 土壤抗剪强度均值大小表现为巨菌草 > 宽叶雀稗 > 裸地, 其大小依次为 21.04, 16.43, 9.89 kPa; 在 0—20 cm 土层, 2 草种抗剪强度均显著大于裸地; (4) 土壤抗剪强度与生物量密度、根表面积密度和分叉数密度极显著正相关, 与根长密度显著正相关; 巨菌草根系的生物量密度是表征土壤抗剪强度的最主要因子, 而宽叶雀稗的则为根长密度。2 种草本植物根系均能提高崩岗洪积扇土壤的抗剪强度, 而巨菌草的效果优于宽叶雀稗。

关键词: 草本植物; 根系; 崩岗; 洪积扇; 抗剪强度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0096-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.017

Effects of Two Herbal Plants' Roots on Soil Shear Strength in a Collapsing Gully Alluvial Fan

LI Hui^{1,2}, HUANG Yanhe^{2,3}, JIANG Fangshi^{2,3},

LIN Jinshi^{2,3}, LI Sishi^{1,3}, LI Fan^{2,3}, ZHENG Zhe^{2,3}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002;

2. College of Resource and Environment Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002;

3. Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002)

Abstract: To study the effects of herbs' root systems on soil shear strength in a collapsing gully alluvial fan, *Pennisetum* sp. and *Paspalum wettsteinii* were chosen as the research objects. A root analysis system (WinRHIZO) was used to characterize the root systems, and the in-situ shearing test was applied to analyze soil shear strength. The results showed that: (1) Root systems could improve soil structure and water status. (2) Root systems of both herbal plants were mainly distributed in the 0—5 cm soil layer, in which root parameters of *Pennisetum* sp. and *Paspalum wettsteinii* were 3.1 to 4.39 times and 2.23 to 2.57 times as great as their average values in the whole soil profile, respectively. Root parameters of *Pennisetum* sp. and *Paspalum wettsteinii* showed a logarithmic and linear decrease with the increase of soil depth, respectively. (3) The average soil shear strength followed the order of *Pennisetum* sp. > *Paspalum wettsteinii* > bare land, being 21.04, 16.43, and 9.89 kPa, respectively. In the 0—20 cm soil layer, shear strength of soil with two herbal plants were significantly greater than that of the bare land. (4) Soil shear strength had extremely significantly positive correlations with biomass density, root surface area density, and fork density ($P < 0.01$), and it also had a significantly positive correlation with root length density ($P < 0.05$). The most important factor of *Pennisetum* sp. to characterize soil shear strength was biomass density, while that of *Paspalum wettsteinii* was root length density. It is concluded that, root systems of both herbal plants could improve soil shear strength in the collapsing gully alluvial fan, and *Pennisetum* sp. was more effective than *Paspalum wettsteinii*.

Keywords: herbal plant; root system; collapsing gully; alluvial fan; shear strength

收稿日期: 2016-11-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(41571272); 国家科技支撑计划项目(2014BAD15B0303); 福建省自然科学基金项目(2015J01156)

第一作者: 李慧(1992—), 女, 福建建瓯人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: lihui9212@163.com

通信作者: 黄炎和(1962—), 男, 广东饶平人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: yanhehuang@163.com

崩岗是一种在水力和重力的长期作用下形成的水土流失类型,是我国南方地区最严重的土壤侵蚀类型之一^[1-2]。崩岗发生时,崩岗内松散的土体遭到流水作用冲刷、搬运后,往往在崩岗口外堆积,形成扇状地形的洪积扇,对下游造成严重危害^[3-4]。洪积扇土质疏松,黏粒少,粗颗粒多,土壤肥力低下。据调查,洪积扇土壤砾石含量占 28.43%,砂粒占 61.89%,粉粒占 8.84%,黏粒占 0.85%,土壤结构性差,极易受到侵蚀。植物是防治水土流失的积极因素,而植物的根系对增强土壤抗剪强度的影响最大^[5]。土壤抗剪强度是衡量土壤抵抗径流剪切破坏能力的指标^[6]。根系通过缠绕和固结等方式提高土壤的抗冲性及抗剪强度,减少土壤侵蚀^[7],其固土的力学机理一直是土壤侵蚀研究关注的问题。周云艳等^[8]研究发现,根长密度可直接影响根土复合体的抗剪强度。湛芸等^[9]研究发现,根表面积密度能很好地解释根系的固土机理。张惠忍等^[10]研究发现,与根长密度及根表面积密度相比,生物量密度对提高根土复合体抗剪强度的影响更大。植物受自身遗传特性及生长环境的影响,其根系力学特性在不同种植物间存在差异,因此植物根系的固土能力也具有种间和环境差异,从而影响固土植物种类选择的正确性,直接关系到土壤侵蚀区的植被恢复重建。

选择耐瘠耐旱、生长速度快、根系发达的林草种作为先锋植物,并采取高密度种植,是固定崩岗泥沙的最主要手段^[11]。据调查,许多草本植物适合在崩岗侵蚀劣地上生长,如宽叶雀稗(*Paspalum wetsteinii*)、巨菌草(*Pennisetum* sp.)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)等,并通过植被的生长情况及其减沙效益等方面来评价其治理效果。林敬兰等^[12]对比了崩岗治理前后的植被覆盖度变化,陈志明等^[13]通过拦蓄泥沙量来评价崩岗植被恢复的生态效益,关于崩岗洪积扇的研究主要为不同培肥方式下土壤的理化效应^[14-15],而从根系力学角度分析植被对崩岗侵蚀劣地固土效果的研究未见报道,从而无法从植物根系的力学性质方面为崩岗治理中的植物筛选提供依据。因此本研究选取近年来推广面积较大的 2 种典型草种,深根系的巨菌草和浅根系的宽叶雀稗作为研究对象,分析 2 种草本植物在不同土层深度下的根系分布特征,探讨这 2 种草本根系对崩岗洪积扇土壤抗剪强度的影响,以期对崩岗治理中水土保持草种的选择及配置提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县河田镇,地理位置为北纬 25°39',东经 116°28',属中亚热带季风气候,年平均降雨

量 1 730.4 mm,年平均气温 18.3℃,历年最高气温 39.4℃,无霜期 265 d^[11]。河田镇土壤含砂量大、颗粒粗,为粗晶花岗岩风化发育的山地丘陵红壤,抗蚀性差,在水力和重力长期作用下侵蚀发育形成崩岗。崩岗分布广,共有 2 266 处,是长汀县水土流失最严重的区域之一,也是我省崩岗侵蚀的主要分布区域。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 选择一处土壤本底值一致并且典型的崩岗冲积扇,在试验区内设置 3 种措施,分别种植宽叶雀稗和巨菌草以及不种植植物的空白区域作为对照。2 种植物的种植密度为 3 600 穴/hm²,每穴施用有机肥 1 kg 作为基肥。巨菌草采用短茎扦插法种植,将带有 3 个节的茎埋入穴中,后将扦插茎的周围用土压实,栽后浇水至土壤湿透。宽叶雀稗采用种籽穴播法,播种量 7.5 kg/hm² 草籽,播种前,按草籽:有机肥:土=1:50:160 的质量比例混合,后把混合草籽均匀播到穴中,播完后再覆土 2~4 cm。2 种草的种植时间为 2015 年 4 月,种植完后的第 3 个月(6 月)和 2016 年 4 月和 6 月各追施尿素 1 次,每次追肥量为 60 kg/hm²。

1.2.2 样地植被调查 2016 年 8 月,对种植巨菌草和宽叶雀稗这 2 种不同措施分别选择 3 块有代表性的小区进行调查,小区面积为 30 m²(6 m×5 m),调查内容包括株高、冠幅及植被的盖度等,并且调查不同草种根系野外垂直方向的生长情况(表 1)。

表 1 样地植被生长情况

草种	平均株高/cm	平均冠幅/cm	根长/cm	植被盖度/%
巨菌草	274±28	110±35	61±10	95
宽叶雀稗	38±12	59±21	38±7	100

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2.3 土壤样品的采集及基本理化性质测定 按“S”形曲线对各措施区进行采样,选取 5 株长势较一致的植株进行采样。每个采样点按层次取土壤样品和环刀样品,每层 3 个重复(土壤取样前 10 h 有自然降雨,总降雨量为 23.8 mm)。按常规方法分别测定土壤容重、水分、有机质、养分等(表 2)。

1.2.4 植被根系的采集及测定 用镰刀割去地上部分后,采用环刀(底面积 100 cm²,高 5 cm)沿着植株竖直向下分层(每层为 5 cm)取各层的原状土样。根据野外调查,巨菌草单株根系最长约为 61 cm,宽叶雀稗单株根系最长约为 38 cm,因此巨菌草措施区按 0—5,5—10,10—15,15—20,25—30,35—40,45—50,55—60 cm 的土层取样;宽叶雀稗措施区按 0—5,5—10,10—15,15—20,25—30,35—40 cm 的土层取样,每层 3 个重复。带回室内取出环刀内土壤并置于

0.05 mm 网筛中冲洗,直至洗出所有根系,将根系放在纱布上吸干表面水分,采用 Epson Perfection 在 300 dpi 下进行灰度扫描,用 WinRHIZO (Pro. 2013e)根系分析系统对根系的长度、表面积、体积等参数进行分析后,将根系放入信封内在 65 ℃ 条件下

烘干至恒重,获得根系的生物量。

根表面积密度=环刀内根系总表面积/环刀体积

根长密度=环刀内根系总长度/环刀体积

根系生物量密度=环刀内根系烘干生物量/环刀体积

表 2 样地 0—20 cm 土壤的理化性质

草种	pH 值	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	水解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全钾/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	颗粒分布/%			
									砾石	砂粒	粉粒	粘粒
									>2 mm	0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm
巨菌草	4.57	5.82	0.24	23.47	88.76	8.38	48.01	24.24	29.57	59.78	9.83	0.82
宽叶雀稗	4.42	5.30	0.20	25.02	85.01	7.78	43.09	21.00	28.36	59.60	11.09	0.95
对照	4.30	3.26	0.01	3.96	82.53	1.79	42.35	6.78	28.43	61.89	8.84	0.85

1.2.5 土壤抗剪强度的测定 土壤抗剪强度测定采用袖珍土壤剪力测量仪(三头抗剪仪),仪器主要由 1 个扭力计和 3 个测量范围值为 0~0.2,0~1,0~2.5 kg/cm² 的叶片组成,本次试验使用范围值为 0~1 kg/cm² 的叶片,将三头抗剪仪的叶片轴插入土壤中,以一定的速度和力度匀速转动测量仪的扭力计,其力度在土壤张力断裂点测得,表盘读数即为实际剪切强度值。在土壤及根系样品采集的同时进行根土复合体抗剪强度的测定。除去植被地上部分后分别测量不同土层的抗剪强度,测量深度与根系采集的深度一致,各土层抗剪强度测定重复 5 次。

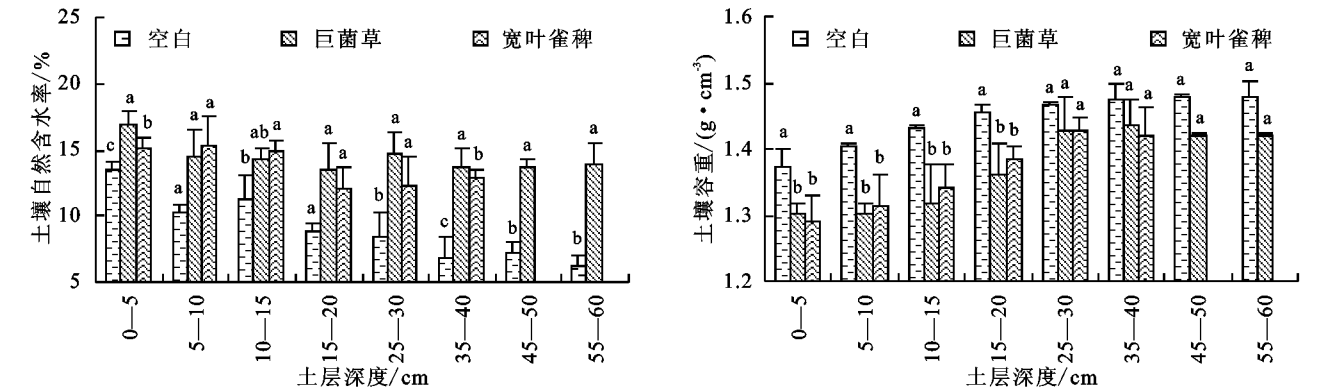
1.2.6 数据处理与分析 采用 Excel 2007 软件对测定数据进行处理以及作图分析。用 SPSS 18.0 软件对土壤含水率、容重、抗剪强度和各草本根系的参数进行方差分析和独立样本 T 检验,以及对土壤含

水率、容重和抗剪强度与根系参数进行 Pearson 相关分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 土壤水分及容重

由图 1 可知,各草本和裸地的土壤自然含水率均随土层深度的增加而表现为递减的趋势。对比不同措施区,巨菌草的土壤含水率均值最高(14.39%),其次为宽叶雀稗(13.74%),裸地最低(9.07%)。各措施的土壤容重均随土层深度增加而表现为递增的趋势。在同一土层中,裸地土壤容重最大,且在 0—20 cm 土层,裸地土壤容重均显著大于植被覆盖的措施区土壤容重。这与邹慧等^[16]在研究植被对土壤容重影响的结果相似,这是由于植物根系能改善土壤的通透性而降低容重。同时,从巨菌草和宽叶雀稗来看,2 草种措施区的土壤容重差异在各土层均不显著。



注:不同小写字母表示不同草本类型不同土层间差异显著(p<0.05)。

图 1 土壤自然含水率及容重随土层深度的变化规律

2.2 根系的分布特征

由表 3 可知,2 个草本植物根系均主要分布在 0—5 cm 土层,该层巨菌草的根长密度、根生物量密度、表面积密度和分叉数密度分别是巨菌草根系均值的 3.1,3.89,3.84,4.39 倍;而宽叶雀稗的根长密度、根生物量密度、表面积密度和分叉数密度分别是宽叶雀稗根系均值的 2.38,2.23,2.35,2.57 倍。同一草种各类型根系参数均表现出随着土层深度的增加而

减小的趋势。通过方程拟合发现,巨菌草的根长密度、根生物量密度、根表面积密度随着土层深度的增加表现为对数函数递减规律(表 4),说明随着土层深度的增加,巨菌草根系减少速率逐渐变缓;宽叶雀稗的各根系参数随着土层深度的增加表现为线性递减的规律(表 4)。李建兴等^[17]对护坡草本植物根系研究发现,根系参数随着土层深度增加而表现为指数函数或线性函数递减,黄林等^[18]发现不同森林类型的

根系根长密度随土层深度表现为指数函数或幂函数的递减规律,说明不同的植物根系随土层变化的规律存在差异。

从单个土层来看,巨菌草的各根系参数均大于宽叶雀稗各参数均值(表 3)。其中,0—5,25—30 cm 土

层巨菌草和宽叶雀稗的根表面积密度及根生物量密度差异显著($p<0.05$)。说明表层巨菌草根系的含量显著多于宽叶雀稗,而由于巨菌草为深根系草种,宽叶雀稗为浅根系草种,所以在 25—30 cm 土层宽叶雀稗根系迅速减少而导致与巨菌草差异显著。

表 3 2 种草本植物的根系特征参数

土层深度/ cm	草本类型	根长密度/ ($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)	根表面积密度/ ($\text{cm}^2 \cdot 100 \text{ cm}^{-3}$)	生物量密度/ ($\text{g} \cdot 1000 \text{ cm}^{-3}$)	分叉数密度/ ($\text{支} \cdot \text{cm}^{-3}$)
0—5	巨菌草	$1.75 \pm 0.27\text{a}$	$18.32 \pm 4.25\text{a}$	$1.23 \pm 0.47\text{a}$	$8.84 \pm 2.98\text{a}$
	宽叶雀稗	$1.31 \pm 0.25\text{a}$	$10.70 \pm 2.87\text{b}$	$0.40 \pm 0.08\text{b}$	$5.33 \pm 1.44\text{a}$
5—10	巨菌草	$0.91 \pm 0.29\text{a}$	$7.07 \pm 3.39\text{a}$	$0.44 \pm 0.21\text{a}$	$2.87 \pm 2.04\text{a}$
	宽叶雀稗	$0.83 \pm 0.28\text{a}$	$6.84 \pm 2.45\text{a}$	$0.26 \pm 0.09\text{a}$	$3.49 \pm 0.96\text{a}$
10—15	巨菌草	$0.61 \pm 0.27\text{a}$	$4.31 \pm 3.00\text{a}$	$0.35 \pm 0.27\text{a}$	$1.89 \pm 2.04\text{a}$
	宽叶雀稗	$0.45 \pm 0.13\text{a}$	$5.67 \pm 3.48\text{a}$	$0.24 \pm 0.13\text{a}$	$2.28 \pm 1.43\text{a}$
15—20	巨菌草	$0.50 \pm 0.14\text{a}$	$3.95 \pm 0.98\text{a}$	$0.29 \pm 0.19\text{a}$	$1.29 \pm 0.21\text{a}$
	宽叶雀稗	$0.28 \pm 0.31\text{a}$	$2.72 \pm 2.40\text{a}$	$0.09 \pm 0.08\text{a}$	$0.85 \pm 0.82\text{a}$
25—30	巨菌草	$0.53 \pm 0.15\text{a}$	$2.41 \pm 0.70\text{a}$	$0.13 \pm 0.09\text{a}$	$0.79 \pm 0.06\text{a}$
	宽叶雀稗	$0.12 \pm 0.05\text{b}$	$0.98 \pm 0.28\text{b}$	$0.08 \pm 0.03\text{a}$	$0.43 \pm 0.05\text{b}$
35—40	巨菌草	$0.32 \pm 0.26\text{a}$	$1.14 \pm 0.54\text{a}$	$0.07 \pm 0.05\text{a}$	$0.31 \pm 0.08\text{a}$
	宽叶雀稗	$0.04 \pm 0.02\text{a}$	$0.38 \pm 0.18\text{a}$	$0.02 \pm 0.00\text{a}$	$0.07 \pm 0.02\text{a}$
45—50	巨菌草	0.09 ± 0.09	0.85 ± 0.68	0.02 ± 0.01	0.11 ± 0.08
55—60	巨菌草	0.02 ± 0.03	0.09 ± 0.15	0	0.02 ± 0.04
平均	巨菌草	0.56	4.77	0.32	2.02
	宽叶雀稗	0.55	4.55	0.18	2.08

注:数据为平均值±标准差;同一土层中不同小写字母表示不同草种之间差异显著($p<0.05$)。

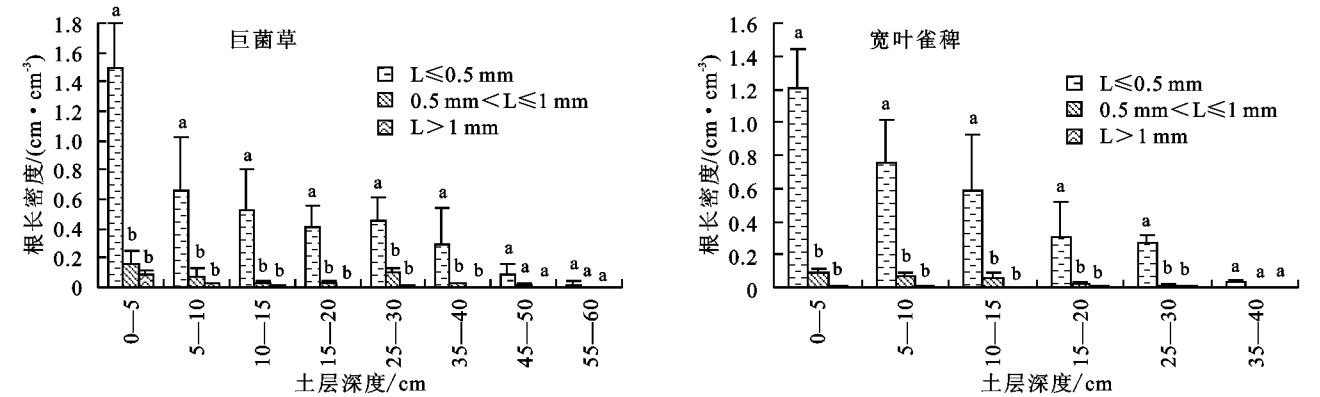
表 4 2 种草种根系参数随土层变化的方程

草 种	根长密度	生物量密度	根表面积密度	分叉数密度
巨菌草	$Y = -0.73\ln(X) + 1.53$ $R^2 = 0.91^{**}, n = 8$	$Y = -0.54\ln(X) + 1.03$ $R^2 = 0.91^{**}, n = 8$	$Y = -8.00\ln(X) + 15.36$ $R^2 = 0.90^{**}, n = 8$	$Y = 21.11e^{-0.77X}$ $R^2 = 0.95^{**}, n = 8$
宽叶雀稗	$Y = -0.25X + 1.43$ $R^2 = 0.96^{**}, n = 6$	$Y = -0.074X + 0.441$ $R^2 = 0.94^{**}, n = 6$	$Y = -2.06X + 11.76$ $R^2 = 0.96^{**}, n = 6$	$Y = -1.05X + 5.76$ $R^2 = 0.93^{**}, n = 6$

注: ** 表示在 0.01 的水平上极显著相关($p<0.01$)。

由图 2 可知,2 种草本植物根系的根长密度均随径级的增大而表现为递减的趋势,也随土层深度的增加而逐渐降低。 $L \leq 0.5$ mm 径级根系的根长密度在各土层均显著大于其他径级的根系。对比 0—40 cm 土层的巨菌草和宽叶雀稗各径级的根长密度发现,巨菌草 $L \leq 0.5$ mm 径级根系的根长密度是巨菌草总根

系的 0.87 倍, $0.5 \text{ mm} < L \leq 1 \text{ mm}$ 的根系为 0.09 倍, $L > 1 \text{ mm}$ 的根系为 0.03 倍;宽叶雀稗 $L \leq 0.5$ mm 的根系是宽叶雀稗总根系的 0.92 倍, $0.5 \text{ mm} < L \leq 1 \text{ mm}$ 根系为 0.07 倍, $L > 1 \text{ mm}$ 的为 0.01 倍。综上,巨菌草粗根更多。



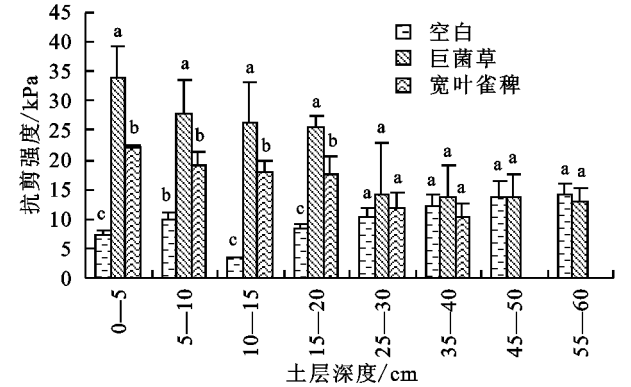
注:不同小写字母表示同一土层相同草种不同径级根系根长密度间差异显著($p<0.05$)。

图 2 2 种草本植物不同径级根系的根长密度

2.3 土壤抗剪强度

由图 3 可知,宽叶雀稗和巨菌草的抗剪强度均随土层深度的增加而减小,而裸地的抗剪强度随土层深度增加而增大。巨菌草的抗剪强度随着土层深度的增加而呈对数函数形式降低($Y=-8.364\ln(X)+26.305,R^2=0.92^{**},n=8$),这与巨菌草的根系参数随土层深度增加而减小的形式一致;宽叶雀稗的抗剪强度随土层深度增加而呈现指数形式降低($Y=30.133e^{-0.175X},R^2=0.92^{**},n=6$);裸地的抗剪强度随土层深度增加而呈线性增加($Y=1.15X+4.71,R^2=0.66^{*},n=8$)。3 种不同措施区土壤抗剪强度均值表现为:巨菌草(21.04 kPa)>宽叶雀稗(16.43 kPa)>裸地(9.89 kPa),与裸地相比,巨菌草抗剪强度的增幅为 112.74%,宽叶雀稗抗剪强度的增幅为 66.13%。以上结果表明,巨菌草和宽叶雀稗根系均能提高根—土复合体的抗剪强度,且巨菌草的效果更明显。

对各土层土壤抗剪强度进一步分析发现(图 3),在 0—5,5—10,10—15,15—20 cm 土层中,巨菌草和宽叶雀稗的抗剪强度值均显著大于裸地,且巨菌草的抗剪强度值也显著大于宽叶雀稗,说明在 0—20 cm 的各土层 2 种草本植物根系对提高土壤抗剪强度的效果显著,且巨菌草优于宽叶雀稗。在 25—30,35—40,45—50,55—60 cm 土层,3 种措施土壤抗剪强度的差异不显著,这说明巨菌草和宽叶雀稗根系对土壤抗剪强度的影响集中在土壤表层以下的 0—20 cm 土层。刘窑军等^[19]等研究也表明,植被根系对三峡库区边坡抗剪强度的影响主要在土壤表层。



注:不同小写字母表示不同措施区相同土层土壤抗剪强度差异显著($p<0.05$)。

图 3 不同措施区土壤抗剪强度随土层深度的变化

2.4 植物根系及土壤性质与土壤抗剪强度的关系

由表 5 可知,从根系的不同径级来看,抗剪强度与

$L>1\text{ mm}$ 的根系、与生物量密度、表面积密度、分叉数呈极显著正相关,与 $L\leq 0.5\text{ mm}$ 根系、 $0.5\text{ mm}<L\leq 1\text{ mm}$ 根系及根长密度呈显著正相关,再次说明根系的存在能够显著的提高土壤的抗剪强度。因为根系越多,根系总表面积越大,与土壤接触的面积就越大,导致根—土之间的摩擦力增大,直接提高了土壤的内摩擦角 φ 与黏聚力 c ,从而提高土体的抗剪强度。

由表 5 可知,各根系参数均与土壤含水率显著正相关,且均与土壤容重显著负相关,说明根系对土壤含水率及容重影响显著。一方面,根系可通过增加土壤中毛管孔隙含量来增强土壤的持水能力,提高含水率。另一方面,根系能显著改善土壤通透性进而降低容重。总之,根系的存在能改善土壤的结构及水分状况。

巨菌草和宽叶雀稗措施区的土壤容重与抗剪强度呈显著负相关关系(表 5),这与倪九派等^[20]的研究结果相反。因为在本研究中,虽然巨菌草和宽叶雀稗小区的土壤容重随土层深度增加而增加,但是对抗剪强度影响最明显的根系却随土层深度增加而减少,因此土壤容重与抗剪强度显著负相关。同样,巨菌草和宽叶雀稗的土壤抗剪强度与含水率呈正相关关系。这与李想等^[21]的研究结果相反。因为本试验中根系与土壤抗剪强度的正相关性掩盖了土壤与水分的负相关关系。综上,根系的存在会使土壤抗剪强度与容重呈负相关,与含水率呈正相关。

选择 $L\leq 0.5\text{ mm}$ (X_1)、 $0.5\text{ mm}<L\leq 1\text{ mm}$ (X_2)、 $L>1\text{ mm}$ (X_3)、根长密度 (X_4)、生物量密度 (X_5)、表面积密度 (X_6)、分叉数密度 (X_7)、容重 (X_8)、含水率 (X_9) 为自变量,以总措施区的抗剪强度 (Y) 为因变量;以巨菌草的各根系参数及土壤性质指标为自变量,以巨菌草的土壤抗剪强度 ($Y_{\text{巨菌草}}$) 为因变量;以宽叶雀稗的各根系参数及土壤性质指标为自变量,以宽叶雀稗的土壤抗剪强度 ($Y_{\text{宽叶雀稗}}$) 为因变量。对以上均进行逐步回归分析得到不同措施区土壤抗剪强度的主导因子方程(表 6)。由表 6 可知,从 2 种草的综合效果看,草本植物根系的生物量密度是影响崩岗洪积扇土壤抗剪强度的主导因子,而从单一草种来看,巨菌草根系影响抗剪强度的主导因子是生物量密度,而宽叶雀稗的则为根长密度。说明草种不同,其影响崩岗洪积扇土壤抗剪强度的主导因子也存在差异。

表 5 根系参数及土壤性质与抗剪强度的相关性

指标	$L\leq 0.5\text{ mm}$	$0.5\text{ mm}<L\leq 1\text{ mm}$	$L>1\text{ mm}$	根长密度	生物量密度	表面积密度	分叉数密度	容重	含水率
抗剪强度	0.62*	0.61*	0.78**	0.65*	0.86**	0.71**	0.67**	-0.83**	0.68**
含水率	0.84**	0.85**	0.70**	0.84**	0.77**	0.82**	0.83**	-0.62*	1
容重	-0.82**	-0.53	-0.57**	-0.81*	-0.70**	-0.80**	-0.79**	1	

注: * 和 ** 分别代表相关系数显著性达 0.05 和 0.01 水平。

表 6 不同措施区土壤抗剪强度的主导因子方程			
不同措施区	主导因子方程	<i>R</i>	<i>n</i>
综合	$Y=13.54+24.02X_5$	0.90**	14
巨菌草	$Y_{巨菌草}=14.68+22.26X_5$	0.94**	8
宽叶雀稗	$Y_{宽叶雀稗}=10.77+11.57X_4$	0.97**	6

3 结 论

(1)2 种草种的根系能改善土壤的结构和水分状况。

(2)2 种草种的根系均主要分布在 0—5 cm 土层,且以直径 $L\leq 0.5\text{ mm}$ 为主。巨菌草根随土层深度增加呈对数函数减小,而宽叶雀稗呈线性减小。

(3)宽叶雀稗和巨菌草均能提高崩岗洪积扇土壤的抗剪强度,且巨菌草的效果更明显;随土层深度的增加,巨菌草的抗剪强度呈对数函数减小,而宽叶雀稗呈指数形式降低,2 种根系提高土壤抗剪强度主要体现在 0—20 cm 深度范围。

(4)土壤抗剪强度与生物量密度、根表面积密度和分叉数密度极显著正相关,与根长密度显著正相关。通过逐步回归分析可知,巨菌草根系对土壤抗剪强度的影响主要体现在生物量密度上,而宽叶雀稗主要体现在根长密度上。

综上所述,崩岗洪积扇经种植巨菌草和宽叶雀稗后,土壤与根系形成的根土复合体抗剪强度得到提高,土壤抗侵蚀能力增强,从而有效地减轻水土流失。在不同土壤层次上,根系提高土壤抗剪强度的效果主要体现在 0—20 cm 的表层,且巨菌草根系对增强土壤抗剪强度的能力强于宽叶雀稗。因此,这 2 种草种在崩岗侵蚀区是值得推广的,尤其是深根系的巨菌草。

参考文献:

[1] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China[J]. Nature Hazards, 2015, 79(1): 455-478.

[2] Lin J S, Huang Y H, Wang M K, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from South-east China[J]. Catena, 2015, 129(2): 9-17.

[3] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of Rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in southeast China[J]. Soil Science Society of America, 2014, 78(5): 1741-1752.

[4] 张勇,丁树文,魏玉杰,等. 崩岗洪积扇养分输移规律研

究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):216-222.

[5] 王甜甜,付登高,阎凯,等. 滇池流域山地富磷区常见植物的水土保持功能比较[J]. 水土保持学报,2014,28(3):67-71.

[6] 陈安强,张丹,熊东红,等. 元谋干热河谷坡面表层土壤力学特性对其抗冲性的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(5):108-113.

[7] 赵丽兵,张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):7-12.

[8] 周云艳,陈建平,杨倩,等. 植物根系固土护坡效应的原位测定[J]. 北京林业大学学报,2010,32(6):66-70.

[9] 谌芸,何丙辉,练彩霞,等. 三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能[J]. 生态学报,2016,36(16):5173-5181.

[10] 张惠忍,李法虎,张心平. 天然草本植被根系对表层土壤抗剪强度的影响[J]. 中国农业大学学报,2015,20(4):189-195.

[11] 陈志彪,朱鹤健,刘强,等. 根溪河小流域的崩岗特征及其治理措施[J]. 自然灾害学报,2006,15(5):83-88.

[12] 林敬兰,郑锦文. 南方红壤区崩岗侵蚀治理研究进展[J]. 亚热带水土保持,2014,26(3):34-37.

[13] 陈志明,许永明,李翠玲. 安溪县崩岗治理模式及实施效果[J]. 中国水土保持,2007(3):15-17.

[14] 马媛,丁树文,邓羽松,等. 五华县崩岗洪积扇土壤分形特征及空间变异性研究简[J]. 水土保持学报,2016,30(5):279-285.

[15] 邓羽松,丁树文,梁传平,等. 安溪崩岗洪积扇不同培肥方式的土壤理化效应[J]. 水土保持学报,2014,28(4):168-171.

[16] 邹慧,毕银丽,金晶晶,等. 采煤沉陷对植被土壤容重和水分入渗规律的影响[J]. 煤炭科学技术,2013,41(3):125-128.

[17] 李建兴,何丙辉,谌芸,等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(10):144-152.

[18] 黄林,王峰,周立江,等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J]. 生态学报,2012,32(19):6110-6119.

[19] 刘窑军,王天巍,蔡崇法,等. 植被恢复对三峡库区土质道路边坡抗剪强度的影响[J]. 土壤学报,2013,50(2):396-404.

[20] 倪九派,袁天泽,高明,等. 土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(3):72-77.

[21] 李想,王瑄,盛世博,等. 不同土地利用方式土壤抗剪强度及其影响因子分析[J]. 水土保持学报,2016,30(5):102-106.